

Tartu Ülikool
Loodus- ja tehnoloogiateaduskond
Füüsika Instituut

Bakalaureusetöö

**Talve ja lumikatte mõju püsivate peegeldajate tihedusele
sõltuvalt maakattetüübist**

Kristjan Kalam

Juhendaja: PhD Kaupo Voormansik

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Instituudi juhataja:

Tartu 2014

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Valdkonna ülevaade	5
1.1 Euroopa Kaugseiresatelliit	5
1.2 Tehisava-radari tööpõhimõte ja pildistusgeomeetria	6
1.3 SAR interferomeetria	9
1.4 Varasemaid tulemusi	10
2. Andmed	11
2.1 Andmetöötlus	11
2.2 Võrdlusandmed	14
3. Tulemused	15
3.1 Püsivate peegeldajate tihedused	15
3.2 Püsivate peegeldajate iseloom.....	17
3.3 Püsivate peegeldajate koherentsus	19
Kokkuvõte	21
Tänuavaldused.....	23
Kasutatud kirjandus.....	24
Winter effects for permanent scatterer densities with respect to land types	26
Lisad	28

Sissejuhatus

Radarkaugseire on saamas üha olulisemaks töövahendiks keskkonnaseires. Põhjuseks asjaolu, et radarkaugseirel on teatud tuntavad eelised maapealsete mõõdistustööde ees: võimalik on madalate kuludega uurida suuri maa-alasid, andmeid kogutakse tihedalt – käesolevas töös kasutatud andmeid kogunud satelliit teeb ülesvõtte samast maa-alast iga 35 päeva järel. Lisaks toimub ühe ülesvõtte saamine lühikese aja jooksul, mistõttu on keskkonnatingimused sarnased ühe mõõtmise vältel, seega on andmete kvaliteet ja täpsus ühetaolised. Satelliidipilte arhiveeritakse ning tänu sellele on võimalik uurida minevikus toimunud protsesse. Kuna satelliidid on andmeid kogunud aastakümneid, siis on võimalik vaadelda muutusi pika perioodi jooksul.

Käesoleva töö eesmärk on uurida, kuidas mõjutab talv ja lumikate PSInSAR (*i k Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar*) meetodi kasutamist ja sellel meetodil saadud tulemusi. PSInSAR meetod on välja töötatud maapinna vertikaalliikumise kiiruse mõõtmiseks ning kasutab selleks objekte, mida nimetatakse püsivateks peegeldajateks – need on objektid, mis ei muuda ajas oma asendit, kuju ega suurst ning peegeldavad radarisignaali alati ühtemoodi tagasi ning on seega heaks reeperiks andmete omavahelisel võrdlemisel. Autori tööülesanne on diferentsiaalse interferomeetrilise tehisava-radariga kogutud andmete analüüs. Uuritakse püsivate peegeldajate liiki, nende koherentsust ning muutusi lumikattega talvel ja suvistes lumikatteta tingimustes Ida-Virumaa kaevanduspiirkonnas.

Autorile teadaolevalt ei ole vaadeldavas piirkonnas ulatuslikke mõõtmisi maapinna vertikaalliikumiste kohta varem tehtud. Üldiselt oleks täpsed mõõtmised maapinnal usaldusväärsemad, kui satelliidiandmete järgi arvutatud tulemused, kuid ulatuslikud maapealsed mõõtmised on sama ala satelliitseirest oluliselt kallimad. Lisaks ülejäänud ülalnimetatud radarkaugseire eelised.

Ida-Virumaa kaevanduspiirkondade uurimine diferentsiaalse interferomeetrilise tehisava-radariga pakub suurt rakenduslikku huvi peamiselt kahel põhjusel. Kui on teada, millisel viisil mõjutab PSInSAR meetodi tulemusi talv ja lumikate, siis on võimalik hakata uurima kaevandamise mõjusid loodusele – kas ja kuidas maapind vajub kohtades, kus maa all on kaevanduskäigud. Teiseks, töös saadud järeldustel talve mõjude kohta on suur tähtsus ka teistes PSInSAR meetodi rakendustes. Eestile ja Eesti uurijatele on kindlasti kasulik, kui selline meetod on välja töötatud kodumaal ning hinnanguid ei pea tellima välisriigist.

Töö on jaotatud kolmeks osaks. Esimeses osas antakse ülevaade valdkonnast, kirjeldatakse tehisava-radari tööpõhimõtet ning tutvustatakse tehisava-radari interferomeetria teoreetilisi aluseid. Teine osa sisaldab ülevaadet töös kasutatud algandmetest ning kirjeldab kogu andmetöötlusprotsessi kuidas jõuti lõppandmeteni. Kolmandas osas esitatakse töö tulemused ning tõlgendatakse saadud tulemusi.

1. Valdkonna ülevaade

Ümber maakera tiirleb sadu satelliite, millel on väga erinevad eesmärgid. Euroopa Kosmoseagentuur ehitas ja lennutas orbiidile satelliidid ERS-1, ERS-2 ja Envisat, et jälgida Maad ning koguda andmeid, mida kasutavad paljude distsipliinide teadlased. Üks tähtis nende satelliitide andmete kasutamisvaldkond on maapinna liikumiste mõõtmine. Selleks kogutakse satelliidi pardal oleva tehisava-radari (*i k Synthetic Aperture Radar - SAR*) andmeid.

1.1 Euroopa Kaugseiresatelliit

ERS-1 (*i k European Remote Sensing satellite - Euroopa Kaugseiresatelliit*) on Euroopa Kosmoseagentuuri esimene Maa vaatlemise satelliit, mille üldisem eesmärk on teostada keskkonnaseiret. ERS-i uurimisvaldkond on laiaulatuslik: ookeanide, polaarjää, maapinna ökoloogia, geoloogia, metsamajanduse, veesügavuse, atmosfäärfüüsika ja meteoroloogia jälgimine (Duchossois, 1991).

ERS-1 lennutati orbiidile 17. juulil 1991 kanderakett Ariane-4 pardal Kourou kosmosesadamast Prantsuse-Guajaanas. ERS-1 tiirles polaarorbiidil kaldega 98,52°, kõrgusel 782-785 km ning perioodiga u. 100 minutit. Missioon lõppes 10. märtsil 2000, kui lakkas töötamast satelliidi pardal olev asendijuhtimissüsteem. Tööaja jooksul jõudis ERS-1 pakkuda rikkalikult vaatlusandmeid (u. 800 000 radaripilti ainuüksi esimese kolme tööaastaga). Viimane tehisava-radaripilt pärineb 7. märtsist 2000. Seega oli ERS-1 aktiivne 8,5 aastat, üle kolme korra enam nominaalsest eluajast. Teine satelliit, ERS-2, saadeti orbiidile 1995 a. ning tema ainus erinevus ERS-1-st oli lisaseade osoonu uurimiseks atmosfääris. ERS-2 missioon lõpetati 2011 a. (Euroopa Kosmoseagentuur, 2011)

ERS satelliitide pardal oli hulk erinevaid instrumente, mis kogusid andmeid paljudeks rakendusteks. Käesolevas töös kasutati ainult tehisava-radari andmeid, teisi ERS pardal olevaid seadmeid siin ei kirjeldata.

ERS-i tehisava-radar (edaspidi SAR – *i k Synthetic Aperture Radar*) saab töötada kahes erinevas režiimis:

- 1) Pildistamisrežiim (*i k IMAGE mode*). Radar töötab C-riba mikrolainetega (keskne sagedus 5,3 GHz), ribalaius 15,55 MHz, polarisatsioon lineaarne vertikaalne, suurim võimsus 4,8 kW, antenni suurus 10 m x 1 m, langemisnurk 23°, ruumiline lahutus 5 m asimuudi suunas ning 30 m maapealse ulatuse suunas, vaateala laius 100 km.

- 2) Lainerežiim (*i k Wave mode*). Parameetrid on sarnased pildistamisrežiimile, kuid uuritakse merepinna peegelduvust ning sellest tehakse järeldusi merepinna lainetuse kohta. Signaalide sagedus 5,3 GHz, polarisatsioon lineaarne vertikaalne, vaatenurk 23°, piltide mõõtmed 5 km x 5 km, lahutusvõime 30 m. (Attema 1991)

Käesolevas töös kasutati andmetöötluseks pildistamisrežiimis kogutud andmeid.

1.2 Tehisava-radari tööpõhimõte ja pildistusgeomeetria

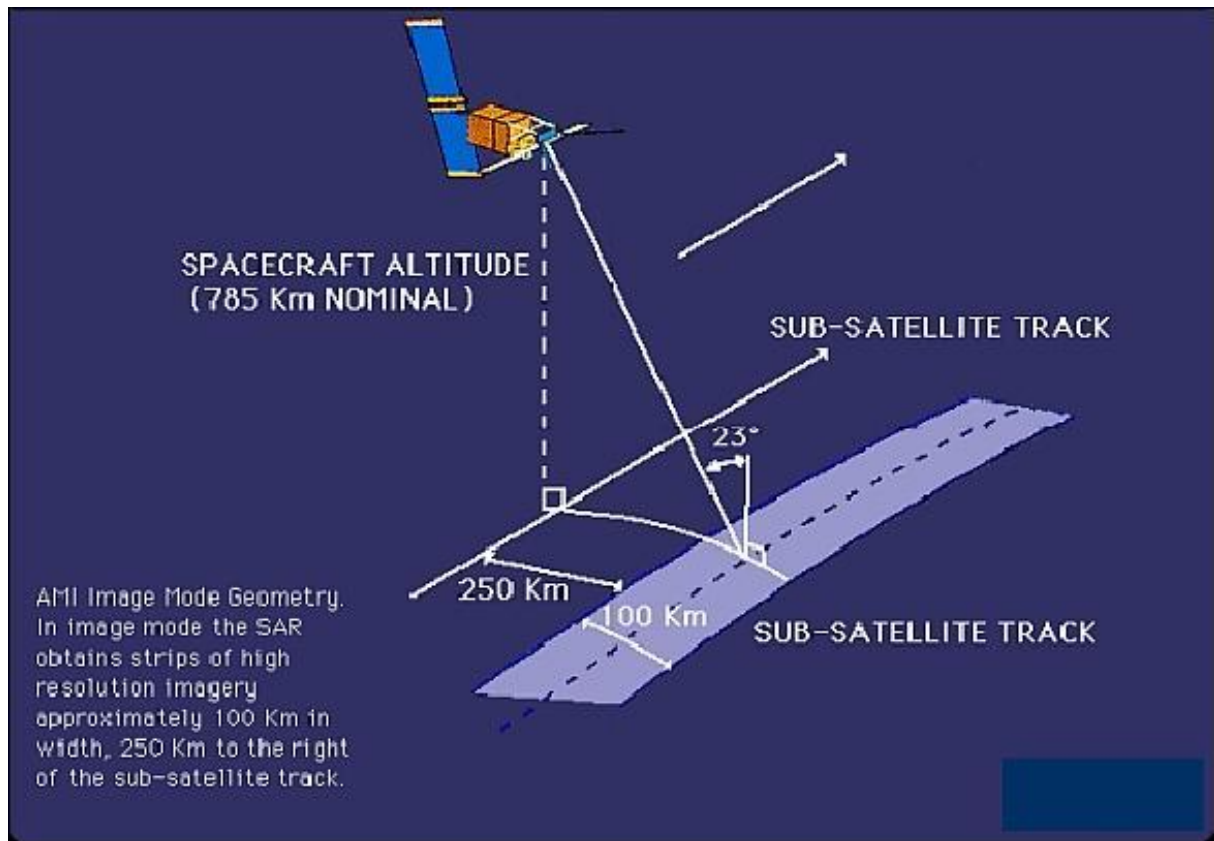
Tehisava-radari puhul kasutatakse tema suhtelist liikumist radari enda ja mõõdetava maapinna vahel. SAR valgustab maapinda koherentse mikrolainekiirgusega sarnaselt laserile ning registreerib väljasaadetud ja tagasipeegeldunud elektromagnetkiirguse intensiivsust ja faasierinevusi (Ferretti, 2000).

Üldiselt on tehisava-radari platvormiks satelliit või lennuk. Selline võimalus on juba 1991. aastast, kui ERS-1 alustas tööd (Euroopa Kosmoseagentuur, 2013).

Tehisava-radar on aktiivne kaugseireinstrument - see tähendab, et ta registreerib omaenda väljasaadetud elektromagnetkiirguse tagasipeegeldumist. Seetõttu ei häiri tema tööd päikesevalguse puudumine ega pilvisus.

Radaripilt on kahemõõtmeline, seega on vaja teada ja kasutada radari lahutusvõimet kahes suunas: radari liikumise suunas ning sellega ristuvast suunas.

SAR lahutusvõime saamiseks ulatuse suunas kasutatakse ära asjaolu, et tegemist on aktiivse instrumendiga. Järelikult on võimalik mõõta aega, mis kulub signaali saatmisest kuni tagasipeegeldunud signaali vastuvõtmiseni. Seega saab eristada punkte maapinnal, kuna signaalil kulub erineval kaugusel olevate punktideni jõudmiseks erinev aeg. See on ka põhjus, miks tehisava-radar mõõdab külgsuunas, mitte otse alla. Otse alla vaadates leiduks alati kaks ühel kaugusel olevat punkti radarist ning ei oleks võimalik määrata, kummast on pärit registreeritud signaal. Lahutusvõime on seda parem, mida lühem on signaali kestvus ning mida kõrgem on tagasipeegeldunud signaali diskreetimissagedus (Massonnet ja Souyris, 2008)



Joonis 1. ERS SAR andmekogumise geomeetria. Langemisnurk 23° , vaateala laius 100 km. Noolega on näidatud satelliidi liikumise (asimuudi) suund. Sellega ristub ulatuse suund. (Euroopa Kosmoseagentuur, 2011)

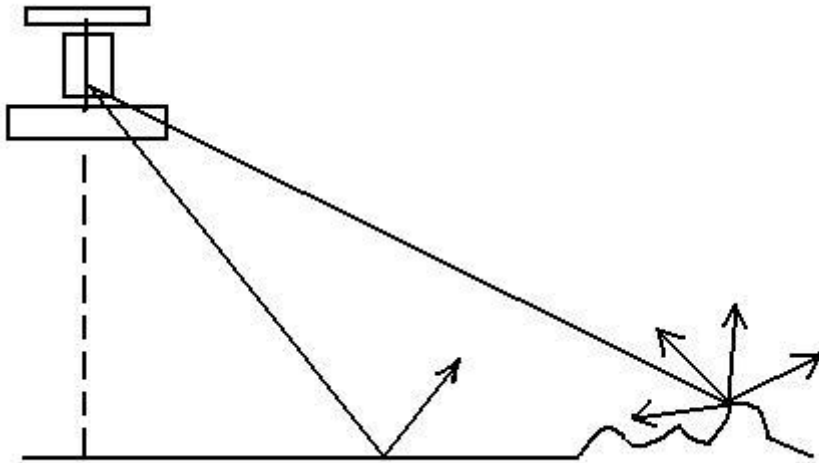
Asimuudi suunas saadakse lahutus tänu asjaolule, et satelliit liigub ning tagasipeegeldunud signaalide sagedus on erinev iga maapinna punkti kohta, kust signaal peegeldub. (Massonnet ja Souyris, 2008)

Pikslite sammuvähe on 4 m asimuudi suunas ning 20 m ulatuse suunas, võrdluseks vastavad ruumilised lahutused olid 5 m ja 30 m (andmed on ülediskreeditud).

SAR saadab välja mikrolaine lainelasse kuuluvaid signaale ning võtab samu tagasipeegeldunud signaale vastu. Tagasipeegeldunud signaalid salvestatakse (või edastatakse reaajas) kujul, kus iga piksli kohta vastuvõetud signaal esitatakse kompleksarvuna. Selle kompleksarvu moodul on signaali amplituud ja faas on SAR signaali faas. Need igat pikslit väljendavad kompleksarvud paigutatakse maatriksisse vastavalt piksli asukohale maapinnal. (Massonnet ja Souyris, 2008)

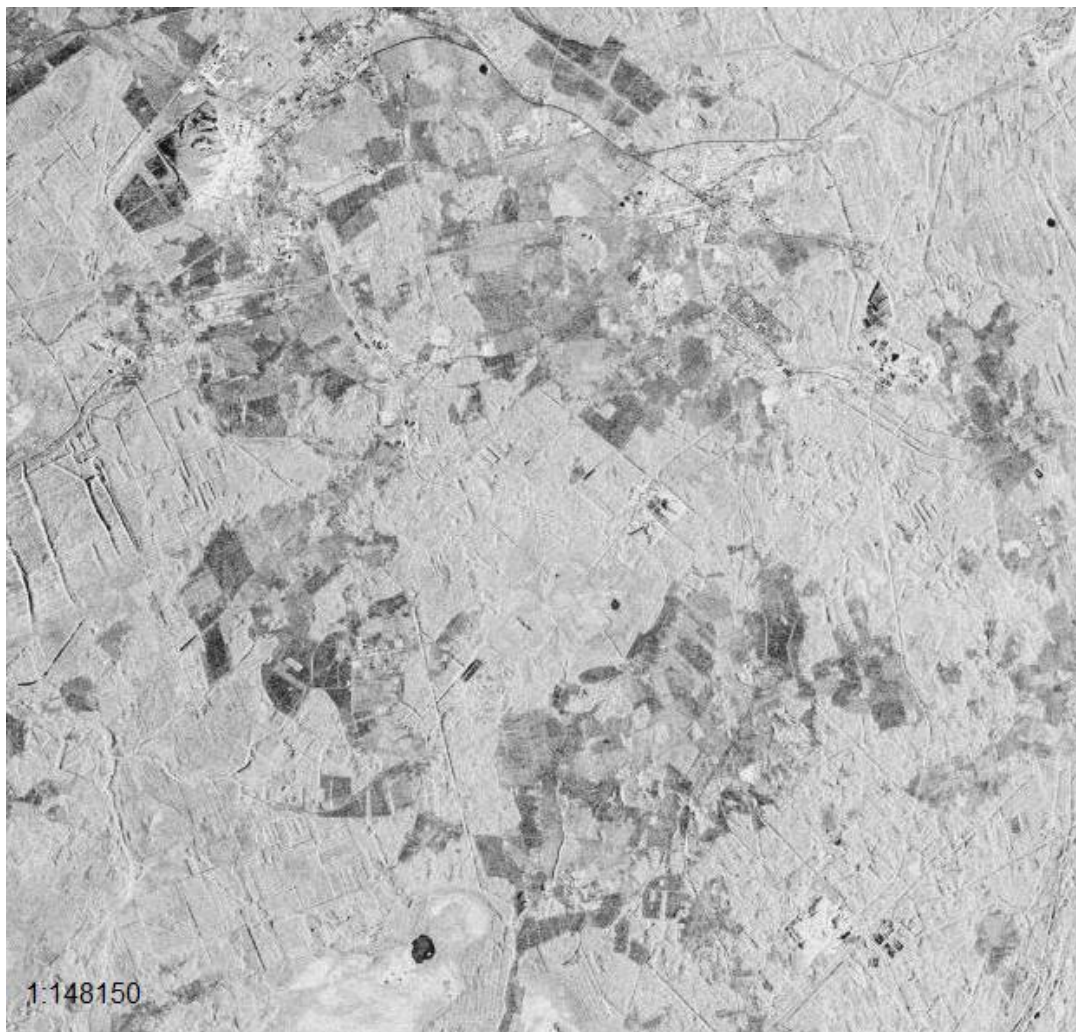
Seega SAR andmeteks kõige algsemal kujul on kompleksarvude maatriksid, kus iga maatriksi element on vastavuses pildi piksliga määratud maapinnatükiga.

Radar registreerib peegeldunud signaali kahte karakteristikut: intensiivsust ja faasi. Signaali intensiivsus on seda suurem, mida rohkem signaali radarini tagasi peegeldub. Selle tõttu on lamedad ja valdavalt edasihajutavad pinnad nagu veekogud radaripildidel tumedad, suurem osa kiirgust hajub eemale ning tagasi radarini jõuab väike osa. Heledamad on ebatasased alad, kust suurem osa kiirgust peegeldub radarini tagasi ning signaali intensiivsus on seega suurem.



Joonis 2. Kiirguse peegeldumine erineva geomeetriaga pindadelt.

Kõige heledamad paistavad SAR-pildil seega linnalised maa-alad, kus on väga palju ebataasusi ehitiste ja muude inimtekkeliste objektide näol ehk püsivaid peegeldajaid. Püsivate peegeldajate faas on stabiilne, ajas reeglina aeglaselt ja sujuvalt muutuv. Faasi muutumise kaudu on võimalik tuletada maapinna ja ehitiste liikumisi, sest kaugusest radari ning mõõdetava objekti vahel faas sõltubki.



Joonis 3. Uuritava maa-ala pilt radarisignaali amplituudide järgi. On näha, et tasased maa-alad, näiteks põllud, peegeldavad vähem signaali tagasi, kui ebatasased alad ning on seetõttu tumedamad.

1.3 SAR interferomeetria

SAR interferomeetriaks nimetatakse radarseire rakendus- ja teadusharu, mis uurib ja kasutab ära SARi faasimõõtmisi. SARi andmed kujutavad endast kompleksarvude maatriksit, kus iga mõõdetud pikslit esindab üks kompleksarv, mille moodul on signaali amplituud ning kompleksarvu faas on registreeritud signaali faas. Haavelmüra (*i k speckle*) tõttu näib üksiku SAR pildi faas juhuslik ning üksinda see kasulikku infot ei anna. Interferomeetrias võrreldakse omavahel kahte või rohkemat samast orbiidiasukohast ja samast maa-alast tehtud pilti. Erinevate piltide faasivõrdluste abil saab tuletada maapinna ja ehitiste liikumist vaadeldaval alal (Ferretti, 2011).

Arvestatava osa andmetöötlusest hõlmab veaanalüüs, vigade allikaid on mitmeid. Satelliidi orbiit ei ole igal ülelennul täpselt identne, seetõttu on iga pildi ülesvõtte geomeetria veidi erinev. Lisaks suurendab piltide tegemise ajaline erinevus pseudojuhusliku faasimustri erinevusi. Atmosfäär mõjutab samuti mõõtmisi, erinevad andmekogumid on saadud erinevate atmosfääritingimuste ajal, mistõttu kiirgus on levinud erinevalt. Kiirguse levikut muudavad näiteks vihm ja pilved, moonutades peamiselt signaali faasi ja vähem amplituudi. (Hanssen ja Ferretti, 2002)

1.4 Varasemaid tulemusi

Püsivate peegeldajate meetod (ingl. k. *Permanent Scatterer SAR Interferometry* - PSInSAR) töötati välja 1999. aastal Milano Tehnikaülikoolis. PSInSAR meetodi maapealsete mõõtmistega kontrollimine näitas, et ERS SAR andmete kasutamise korral on täpsus umbes 0,75 mm (Ferretti *et al.*, 2007). 2007. aastal orbiidile saadetud Saksa Kosmosekeskuse (*i k German Aerospace Center – DLR*) radarsatelliidiga TerraSAR-X on võimalik saavutada veel täpsemaid tulemusi. Tänu pikkadele ja tihedatele aeGRIDadele on saavutatav täpsus isegi kuni 0,1 mm (Euroopa Kosmoseagentuur, 2013).

PSInSAR meetod sobib küll rohkem linnalisele keskkonnale, sest vajumisi on kõige parem arvutada nn. püsivate peegeldajate pealt. Püsivad peegeldajad on objektid, mis hajutavad neile peegelduvat kiirgust stabiilselt samas suunas tagasi. Need on üldjuhul inimtekkelised objektid. Siiski on võimalik saada häid tulemusi ka Ida-Virumaa kaevandusaladelt, kuna ka seal on selliseid objekte piisavalt, nagu hooned, sidemastid jms. Varem on Eestis sellist andmetöötlust tehtud kahel korral, satelliidiandmete järgi mõõdeti maapinna vertikaalliikumisi Tartu ja Pärnu linnas.

Autori uuritava teemaga haakub näiteks üks prantsuse teadlaste tehtud uuring, kus jälgiti Prantsusmaal Gardanne'i lähedal söekaevandamisest tingitud maapinna vajumist kasutades ERS-1 ja ERS-2 SAR andmeid aastatest 1992-1995. Tõestus, et just söekaevandamine vajumist põhjustas, seisnes kõnealuse töö autorite sõnul selles, et SARi andmete järgi oli võimalik näha, kuidas maapinna vajumise suurim muutus toimus reeglina just seal, kus parasjagu toimus kaevandamine. Võrdlus maapealsete mõõtmistega kinnitas satelliitmõõtmiste tulemusi (Carnec ja Delacourt, 2000).

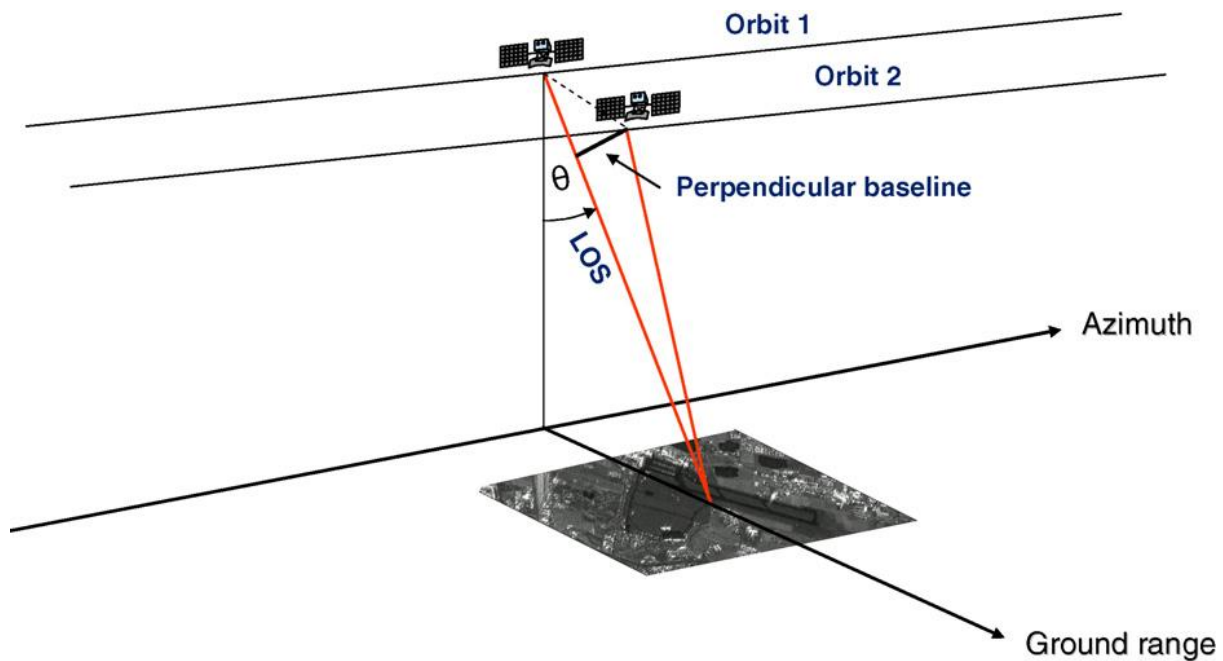
2. Andmed

2.1 Andmetöötlus

SAR andmete töötamiseks kasutati arvutiprogramme StaMPS 3.3 (*i k Stanford Method for Persistent Scatterers*), Doris 4.06, Snaphu, Triangle ning Matlab, töötus toimus Linux keskkonnas. Kasutaja suhtleb otse ainult programmiga StaMPS, mis omakorda käskude täitmiseks kasutab teisi ülalnimetatud programme. Töötuse lõppfaasis avatakse ka programm Matlab valmis piltide graafiliseks kujutamiseks. Algandmeteks olid SLC (*i k Single Look Complex*) vormingus ERS SAR radaripildid, kus iga piksli kohta on salvestatud signaali amplituud ja faas. Alustuseks välistati ühe orbiidi numbriga piltide hulgast need, mille efektiivne vahedkaugus oli liiga suur (enam kui 500 m). Efektiivse vahedkauguse suurenedes kasvab piltide üldine müra ja väheneb koherentsus, seetõttu jäetakse töötusest välja liiga suure efektiivse vahedkaugusega pildid.

Usaldusväärsete tulemuste saamiseks on vaja vähemalt 10 sama sensori samade parameetritega (pildistusrežiim, orbiidi number, langemisnurk) pilti (Hooper 2009).

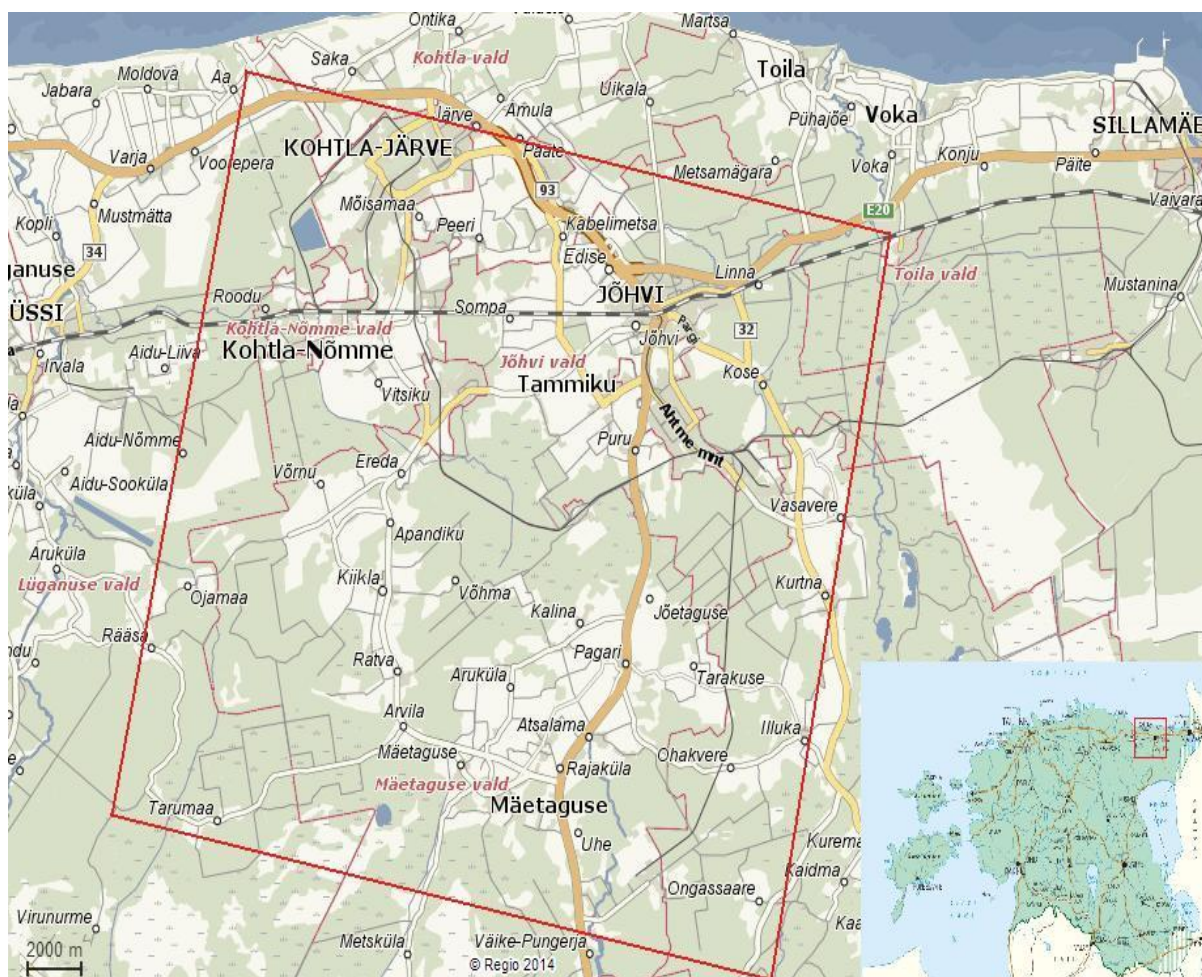
Järgmiseks tuleb valida piltide hulgast üks juhtpilt, mille suhtes aetakse paika kõik ülejäänud, nn alampildid. Juhtpildi valikul tuleb lähtuda asjaolust, et iga pilt on tehtud ruumiliselt veidi erinevast asukohast, satelliit lendab järgmisel ülelennul samast kohast veidi erineval kaugusel eelmisest ülelennust. Seega iseloomustab iga pilt efektiivne vahedkaugus (vt Joonis 4). Juhtpilt tuleb valida nii, et teiste piltide efektiivne vahedkaugus tema suhtes oleks võimalikult väike. (Hooper 2009)



Joonis 4. Kahe ülesvõtte orbiidiasukohtade efektiivne vahekaugus (ingl k *perpendicular baseline*). (Ferretti *et al*, 2010)

Pildid esitatakse programmile StaMPS määrates ära juhtpildi ja alampildid. SAR vaateala ulatuse suunas on 100 km ning pildid on jaotatud ruudukujulisteks, seega üks töötluks valmis olev SLC-fail kätkeb endas 100 km x 100 km ala. Nii suure ala uurimine ei ole käesolevas töös otstarbekas, kuna võttis uurimistöös kasutatud arvutil liiga kaua aega. Seega järgmiseks sammuks on uuritava ala täpsustamine. (Hooper 2009)

Autor valis Ida-Virumaal uuritavaks alaks 24 km x 24 km ruudu, keskpunktiga 59,30° N ja 27,32° E. Ala valiti nii, et sinna jääks nii asulaid kui ka looduslikke maastikke. Uuritav ala Ida-Virumaal on maakattelt suures osas mets. Natuke vähem on rohumaad ja haritavat maad. Uuritava ala pindalast üsna tagasihoidliku osa moodustab hoonestatud ala, milleks on Kohtla-Järve, Kohtla-Nõmme, Jõhvi ning mõned väiksemad asulad. Uuritavasse maa-alasse jäävad Ahtme, Tammiku, Sompa, Viru ja Ojamaa kaevandused ning Aidu karjäär. (Karu, 2012)



Joonis 5. Uuritav ala Ida-Virumaal, väljalõige Eesti kaardist internetiaadressilt kaart.delfi.ee.

Valitud andmed töötlemiseks Ida-Virumaa kohta on ERS-1 SAR pildid orbiidinumbriga 93, mille täpsed parameetrid on toodud lisades.

Edasi tehti piltide üle-diskreetimine. See tähendab, et nii ulatuse kui ka asimuudi suunas kahekordistatakse pikslite arvu interpoleerimise teel 16 pikslite laiuse sinc-funktsiooniga. See samm tõstab piltide kohakuti ajamise kvaliteeti ning püsivate peegeldajate arvu. Iga pildile lisatakse orbiidiandmed, mis loetakse välisest failist. Interferogrammide moodustamiseks on vaja alampildid juhtpildiga kohakuti ajada ning seejärel teisendada alampildid juhtpildi koordinaadistikku. Peale interferogrammide moodustamist arvutatakse iga piksi geograafilised koordinaadid ning seejärel on võimalik liikuda püsivate peegeldajate leidmise juurde. (Hooper 2009)

Interferogrammis hinnatakse iga kandidaatpiksli faasimüra. Müra omaduste põhjal toimub püsivate peegeldajate valik. Valikukriteeriumitena on kasutatud StaMPSi soovituslikke ja vaikeväärtusi: (Hooper 2009)

- Leitud püsivaid peegeldajaid kärbitakse signaali amplituudi dispersiooni (piksli amplituudi aegrea standardhälve jagatud aegrea keskmise amplituudiga) põhjal. Autor kasutas töös dispersiooni piirväärtusena 0,4. See tähendab, et iga püsiva peegeldaja kandidaat sellest suurema dispersiooni väärtusega jäeti välja.
- Iga piksli jaoks leitakse temaga seotud pikslipaaride faasimüra standardhälve, mis võib olla maksimaalselt 1,0.
- Iga naaberpikslite paari jaoks hinnatakse faasimüra jaotust ajalise silumisaknaga, mille ulatus on 730 päeva.
- Vaadeldava piksli maksimaalne müra ei tohi olla suurem kogu ala keskmisest.

Lõpuks pakitakse lahti püsivate peegeldajate faas ning leitakse maapinna vertikaalne deformatsioon. (Hooper 2009)

2.2 Võrdlusandmed

Saadud tulemuste visualiseerimiseks ja uurimiseks kasutati vabavaralist geograafilise info haldusprogrammi QGIS (*i k Quantum Geographic Information System*). Töös leitud andmete võrdluseks on võetud Eesti Maa-ameti geoportaali kaardirakendusest 1994.-2000. aasta aerofotod ning Keskkonnaagentuuri tehtud CORINE (*i k Coordination of Information on the Environment*) andmebaasi info maakatete kohta uuritava alal. Satelliidiandmete põhjal on leitud kolm püsivate peegeldajate aegrida:

- 1) 1993.-2001. aasta aegrida, kus on kasutatud kõiki töös nimetatud orbiidiandmeid (22 pilti)
- 2) 1993.-2001. aasta aegrida, kus on kasutatud talvekuudel kogutud andmeid (oktoober – veebruar, 12 pilti).
- 3) 1995.-1999. aasta aegrida, kus on kasutatud suvekuudel kogutud andmeid (märts – september, 10 pilti).

Võrdlusandmete ja leitud tulemuste samaaegseks kuvamiseks on viidud kõik pildid Maa-ameti aerofotode koordinaatsüsteemi WGS 84 EPSG:4326.

3. Tulemused

3.1 Püsivate peegeldajate tihedused

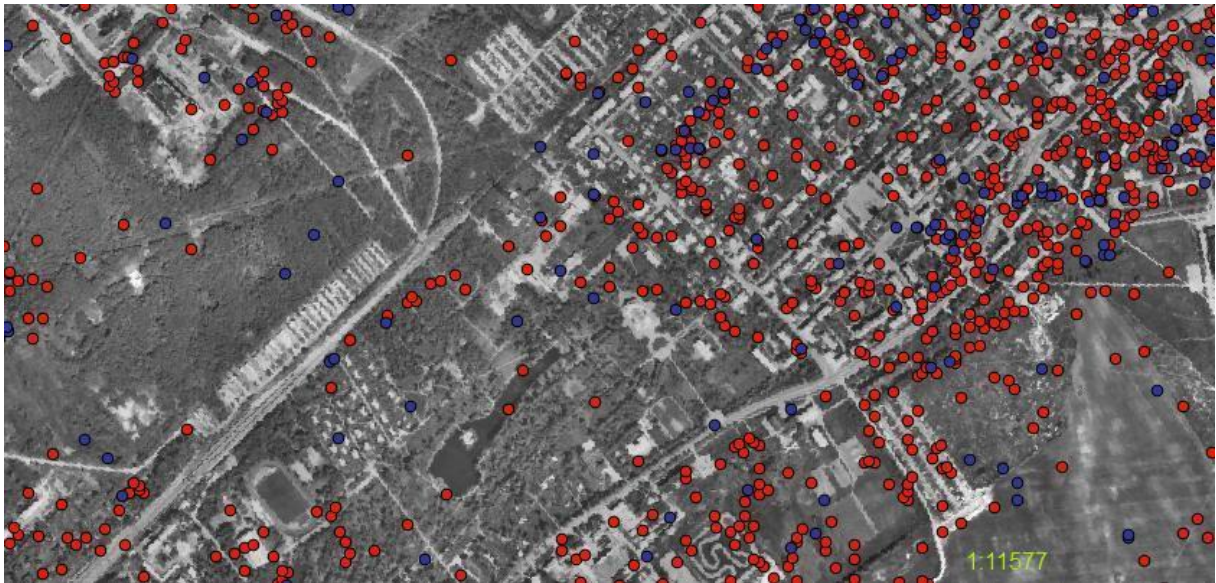
CORINE maakatete andmebaasi ja leitud püsivaid peegeldajaid võrreldes on saadud järgmised püsivate peegeldajate tihedused kasutatud andmete aastaegade ja maakattetüüpide järgi, ühikuks on püsivat peegeldajat ruutkilomeetri kohta (PS/km²):

Tabel 1. Püsivate peegeldajate tihedused aastaaja ning maakattetüübi järgi.

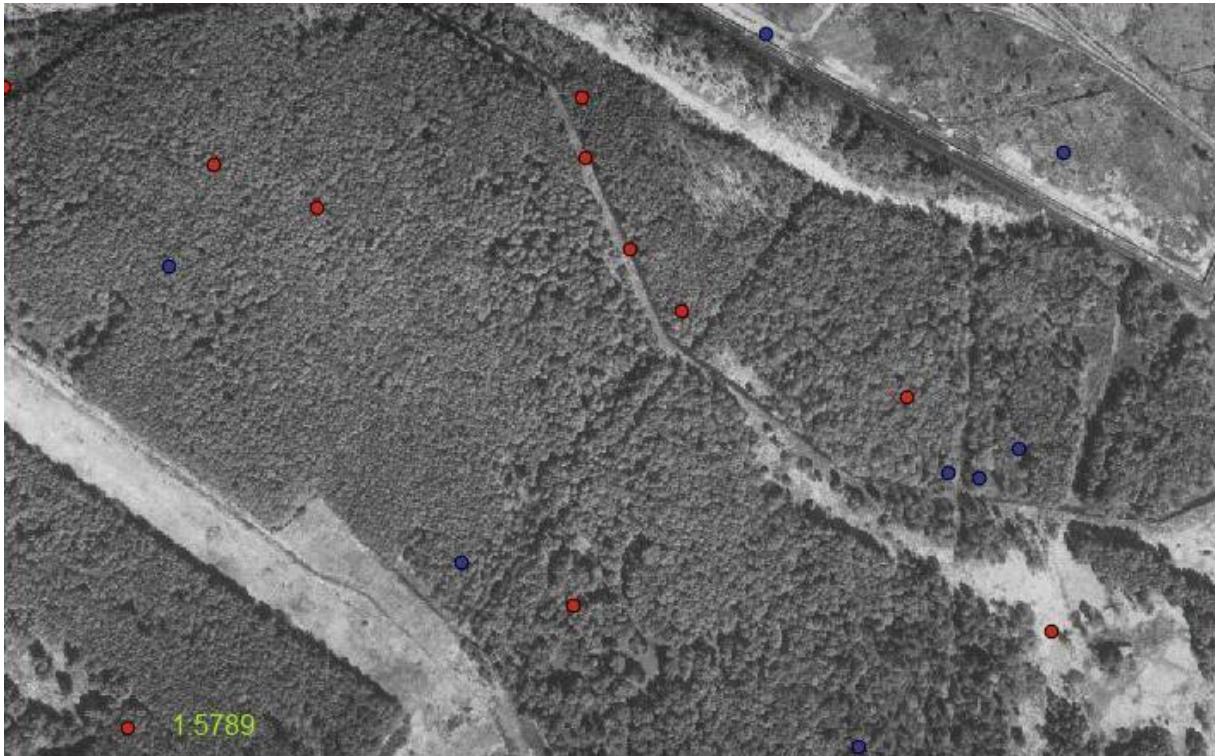
	Aastaringne, PS/km ²	Suvi, PS/km ²	Talv, PS/km ²
Hoonestatud ala	184	272	48,0
Haritav ja rohumaa	10,9	63,6	18,8
Lehtmets	6,40	23,1	15,1
Okasmets	3,30	31,6	20,1
Veekogu	-	3,60	14,5
Kogu ala	14,2	62,9	17,5

Püsivate peegeldajate tihedusest saab järeldada, et ainult suvekuude mõõtmisi kasutades on võimalik saada suurimaid punktihulkasid kõigi maakattetüüpide jaoks. Veel on huvitav märkida, et nii okas- kui ka lehtmetsa jaoks on püsivate peegeldajate tihedus aastaringselt väga madal. Samas suve- ja talveandmeid eraldi vaadates on see näitaja oluliselt kõrgem. Sellest järeldub, et püsivateks peegeldajateks metsa-aladel on suvel ja talvel erinevad objektid.

Talvel on hoonestatud alal väga vähe püsivaid peegeldajaid, võrreldes suvega. See on tõenäoliselt tingitud lumikattest. Kuna enim püsivaid peegeldajaid saadakse hoonestatud aladelt, siis võib see viia järelduseni, et talvel kogutud andmed tuleks rakendustes kõrvale jätta. Hoonestatud alade uurimisel võib selline samm olla õigustatud, kuid kõigi teiste maakattetüüpide korral pigem mitte. Kõige enam on talvekuude andmetest kasu veekogude uurimisel, kus talvepildid kannavad enim infot. See on tingitud veekogude jäätumisest ning jääkatte püsiva peegeldajana käitumisest.



Joonis 5. Punased punktid on püsivad peegeldajad suvekuude andmete järgi, sinised punktid talvekuude andmete järgi.



Joonis 6. Püsivad peegeldajad metsa-aladel. Punased punktid suvekuude andmete põhjal leitud, sinised talvekuude andmete põhjal.

Joonisel 5 on näha, et hoonestatud alal on püsivaid peegeldajaid palju tihedamalt, kui mujal. Joonis 6 illustreerib väidet, et mets annab suvel ja talvel erinevaid püsivaid peegeldajaid. Joonise põhjal võib järeldada, et suvekuude andmete põhjal on püsivateks peegeldajateks puudevahelised alad, näiteks teed. Samas talvekuudel on püsivad peegeldajad juhuslikud objektid puudega kaetud aladel. Lehtmetsas on tõenäoliselt põhjuseks lehtede langemine puult talvekuudel. Ilma lehtedeta puuvõrad on oluliselt stabiilsemad objektid, kui lehtes puud ning mõned puuvõrad osutuvad piisavalt stabiilseks, et olla püsivaks peegeldajaks.

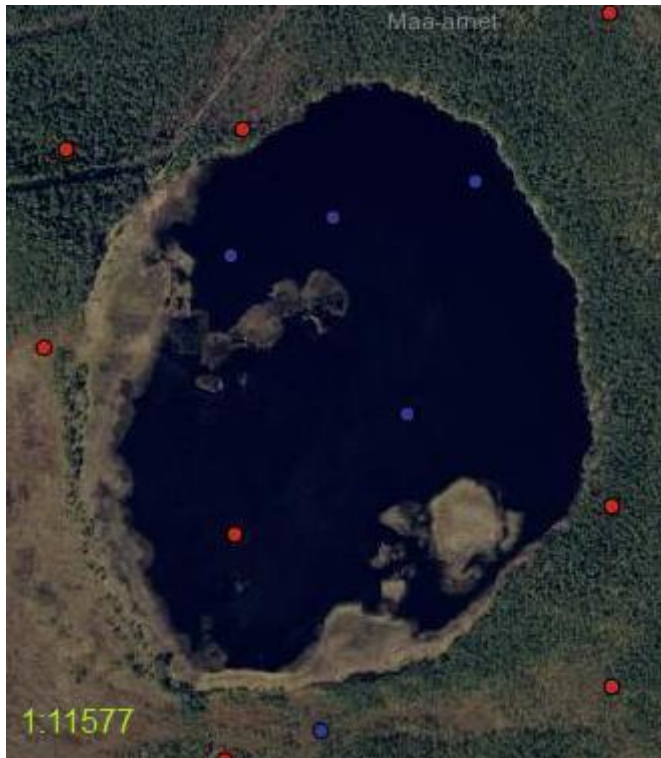
3.2 Püsivate peegeldajate iseloom

Võrreldes satelliidiandmetest tuletatud püsivaid peegeldajaid aerofotodega, saab hinnata, millised objektid osutuvad püsivateks peegeldajateks. Kindlalt saab väita, et hoonestatud aladel on enamjaolt püsivateks peegeldajateks hooned, kuid osa püsivaid peegeldajaid on ka teed, spordiväljakud jms. Teooriaga on kooskõlas, et enim püsivaid peegeldajaid annavad hoonestatud alad (Ferretti *et al*, 2000).



Joonis 7. Püsivad peegeldajad haritavaal maal. Punased punktid on leitud suvekuude andmete põhjal, sinised talvekuude põhjal.

Ilma maapealse kontrollimiseta on keeruline öelda, missugused objektid on püsivateks peegeldajateks põllul. Pealtnäha tunduvad punktid juhuslikud, kuid ilmselt on siiski tegu püsivate ja ajas muutumatute objektidega, nt suur kivi või sidemast.



Joonis 8. Püsivad peegeldajad veekogus. Punased punktid on andmed suvekuudest, sinised talvekuudest.

Veekogu annab püsivaid peegeldajaid rohkem talvel. Väga tõenäoliselt on põhjuseks veekogu jäätumine. Jäätunud pind on ajas muutumatu ja stabiilse faasiga, aga lahtine vesi liigub pidevalt ja temalt tagasi hajunud signaali faasi käitumine ajas on juhuslik.

3.3 Püsivate peegeldajate koherentsus

Interferogrammi kvaliteeti saab mõõta koherentsuse abil. Üldine valem koherentsuse arvutamiseks on

$$\rho = \left| \frac{\langle S_1 \cdot S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 \cdot S_1^* \rangle \cdot \langle S_2 \cdot S_2^* \rangle}} \right|,$$

kus ρ on koherentsus, S_1 ja S_2 on interferogrammi vastavate pikslite kompleksväärtused, ülätärn tähistab kaaskompleksarvu ning nurksulud keskmistamist. (Massonnet ja Souyris, 2008)

Koherentsus saab olla reaalarv 0 ja 1 vahel ning 0 tähendab seda, et koherentsus puudub täielikult ning interferogramm ei oma mingit infot, koherentsuse väärtus 1 tähendab, et pildil

puudub igasugune müra ning vastavate pikslite faasivahe on alati konstantne. (Euroopa Kosmoseagentuur, 2012)

Käesolevas töös leiti iga aegrea jaoks kõigi aegreas esinevate interferogrammide keskmine koherentsus ning ka püsivate peegeldajate keskmine koherentsus, et aegridu omavahel võrrelda.

Tabel 2. Aegrea koherentsused aastaaegade järgi.

	Aastaringne	Suvi	Talv
Kogu aegrea koherentsus	0,25	0,27	0,26
Püsivate peegeldajate koherentsus	0,33	0,31	0,27

On näha, et talvel kogutud andmed on madalama koherentsusega, kui suvel, aga mitte märkimisväärselt. Veidi üllatavaks võib pidada asjaolu, et aastaringsete andmete järgi arvutatud püsivate peegeldajate koherentsus on kõrgem, kui ainult suvekuude andmete järgi leitud püsivatel peegeldajatel, kuigi suvel peaks looduses toimuma vähem muutusi kui aastaringsetel ning seega koherentsus olema kõrgem.

Kokkuvõte

Töö eesmärgiks oli uurida PSInSAR meetodil arvutatud püsivate peegeldajate tihedust, koherentsust ja liiki sõltuvalt aastaajast ning leida seaduspärasused, kuidas talv ja lumikate neid parameetreid mõjutavad.

Töös kasutati Euroopa Kosmoseagentuuri satelliitide ERS-1 ja ERS-2 pardal olevate tehisava-radarite andmeid ajavahemikust 12.02.1993 kuni 15.01.2001, kokku 22 pilti. Piltidest moodustati 3 aegrida: kõigi andmetega, ainult suvekuude andmetega ning ainult talvekuude andmetega. Andmetöötluses kasutati vabavaralisi programme Doris 4.06 ja StaMPS 3.3. Tulemuste visualiseerimiseks, püsivate peegeldajate tiheduse arvutamiseks ning liigi hindamiseks kasutati CORINE andmebaasi ning geoinfosüsteemi QGIS.

Püsivate peegeldajate tihedused kõigil maakattetüüpidel on teooriale vastavalt suurimad suvekuude andmete põhjal arvutatult ning hoonestatud aladel. Püsivate peegeldajate tihedus aastaringsete andmete põhjal on $14,2 \text{ PS/km}^2$, suvekuude andmete põhjal $62,9 \text{ PS/km}^2$ ning talveandmete põhjal $17,5 \text{ PS/km}^2$, hoonestatud alal on need tihedused vastavalt $183,7 \text{ PS/km}^2$, $272,0 \text{ PS/km}^2$ ning $48,0 \text{ PS/km}^2$. Püsivad peegeldajad hoonestatud aladel on seotavad konkreetsete ehitistega. Lisaks leiti, et talvel kogutud andmeid ei ole siiski mõistlik PSInSAR meetodit kasutavates töödes ignoreerida, sest metsa-aladel ning haritaval maal on püsivate peegeldajate tihedus talveandmete järgi küll madalam kui suveandmete, kuid siiski oluliselt kõrgem, kui kasutades aastaringseid andmeid. Iseäranis suurt huvi pakuvad talveandmed juhul, kui on tarvis uurida veekogusid, sest antud töös leiti, et jäätunud veekogu annab püsivaid peegeldajaid $14,5 \text{ PS/km}^2$, samas kui suvekuudel on see tihedus $3,6 \text{ PS/km}^2$.

Püsivate peegeldajate koherentsus on talvel väiksem, kui suvel - vastavalt 0,27 ja 0,31, mis samuti on kooskõlas teooriaga ning kajastub ka püsivate peegeldajate tiheduses, kus madalama koherentsusega interferogrammidest on leitud vähem püsivaid peegeldajaid. Püsivate peegeldajate peamine liik on inimtekkelised objektid: hooned, teed, sillad, sidemastid jms. Talvel on ka jäätunud veekogus juhuslikud punktid püsivateks peegeldajateks ning samuti on püsivateks peegeldajateks piisavalt stabiilsed looduslikud objektid, näiteks suured kivid ja kännud.

Töö tulemusena saab väita, et hoonestatud alade uurimisel on mõistlik talvel kogutud andmeid mitte kasutada, kuid teiste maakattetüüpide puhul on talveandmete kasutamine õigustatud. Iseäranis veekogude puhul, kus jäätunud vesi annab oluliselt rohkem püsivaid peegeldajaid, kui vedelas olekus vesi ning metsa-aladel, kus püsivateks peegeldajateks on suvel ja talvel

erinevad objektid – suvel näiteks metsavahelised teed ning talvel lehtmetsa ilma lehtedeta puuvõrad.

Saadud tulemusi saab kasutada edaspidistes töödes PSInSAR meetodit rakendades ja maapinna deformatsioonikiirusi arvutades. Tulevaste uurimuste koostajad saavad tõsta oma tööde täpsust, kui nad teavad, millise aastaaja andmeid sõltuvalt maakattetüübist on kõige mõistlikum kasutada.

Tänuavaldused

Soovin tänada juhendajat Kaupo Voormansikut, kes pühendas minu aitamisele ja nõuannete jagamisele palju aega ja vaeva, andis pidevalt tööle konstruktiivset tagasisidet ning aitas tõlgendada saadud tulemusi. Samuti tänan Martin Valgurit, kes oli suureks abiks andmetöötuse ja programmide kasutamise juures ning aitas samuti tulemuste tõlgendamisega.

Kasutatud kirjandus

- Attema, E. P. W. (1991) The Active Microwave Instrument On-Board the ERS-1 Satellite. *Proceedings of IEEE*, Vol. 79, No.6, June: 791- 799
- Carnec, C., Delacourt, C. (2000) Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics* 43(1): 43-54.
- Duchossois, G. (1991) The ERS-1 Mission Objectives. *ESA Bulletin* No 65: 16-26
- Ferretti, A. (2010). Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of geodynamics*, 49: 2-3
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2000). Measuring subsidence with SAR interferometry applications of the permanent scatterers technique. In *Workshop on Advanced Techniques for the Assessment of Natural Hazards in Mountain Areas*, 6: 1-3
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2007) Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5): 1142-1153
- Hanssen, R. F., Ferretti, A. (2002) Deformation Monitoring by Satellite Radar Interferometry. *GIM International*, 9, 52-57
- Hooper, A. (2009) StaMPS/MTI Manual, Version 3.1: 7-18
- Karu, V. (2012) Potential Usage of Underground Mined Areas in Estonian Oil Shale Deposit. *Doktoritöö*. Tallinna Tehnikaülikool: Mäeinstituut: 10-11
- Massonnet, D., Souyris, J. C. (2008) Imaging with Synthetic Aperture Radar: 55-56, 232-233, 251-252
- Prati, C., Ferretti, A., Perissin, D. (2010) Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations. *Journal of Geodynamics* 49: 161-170

Internetiallikad:

Euroopa Kosmoseagentuur, 2011. Eo Portal Directory.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/ers-1> (26.05.2014)

Euroopa Kosmoseagentuur, 2011.

http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/ERS_overview (26.05.2014)

Euroopa Kosmoseagentuur, 2012. Radar and SAR Glossary.

<http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR5-2.htm#eph.asar.gloss.radsar> (26.05.2014).

Euroopa Kosmoseagentuur, 2013. Eo Portal Directory.

<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e> (26.05.2014).

Winter effects for permanent scatterer densities with respect to land types

Kristjan Kalam

Summary

Objective of this paper is to research the densities, coherences and types of permanent scatterers, with respect to season of the year, using a remote sensing technique called PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar).

Data used in this work is from synthetic aperture radars which were on board satellites ERS-1 and ERS-2. Used data is from 12.02.1993 to 15.01.2001, 22 images altogether. This data is separated to 3 time series: all data, summer data and winter data. Freeware programs Doris 4.06 and StaMPS 3.3 were used for data processing. CORINE database and QGIS (Quantum Geographic Information System) were used to visualize the results, calculate permanent scatterer densities and assess the types of permanent scatterers.

Permanent scatterer densities on all land types are highest based on data from summer months, as is according to theory. Permanent scatterer density according to all-year data is $14,2 \text{ PS/km}^2$, according to summer data $62,9 \text{ PS/km}^2$ and according to winter data $17,5 \text{ PS/km}^2$, on artificial surfaces these densities are respectively $183,7 \text{ PS/km}^2$, $272,0 \text{ PS/km}^2$ and $48,0 \text{ PS/km}^2$. Permanent scatterers on artificial surfaces are associable to specific objects. One result of this paper is also that winter data should not be ignored when using the PSInSAR method, since permanent scatterer densities in forests and on agricultural land are indeed lower when using winter data than using summer data, but a lot higher than using all-year data. Winter data is especially useful when researching water bodies, because in this paper, it is found that a frozen water body has a permanent scatterer density of $14,5 \text{ PS/km}^2$, while in summer time it is only $3,6 \text{ PS/km}^2$.

Permanent scatterer coherence is lower in winter data, than in summer data – 0,27 and 0,31 respectively. This is also in accordance to theory and it also reflects in calculated permanent scatterer densities – interferograms with lower coherence produced less permanent scatterers. Main types of permanent scatterers are artificial objects, such as buildings, roads, bridges, telecommunication masts and so on. In winter time, random points on a frozen water body are also permanent scatterers. Stable enough natural objects also act as permanent scatterers, such as large rocks.

As a result of this work, it can be said that when researching artificial surfaces, it is reasonable to leave out winter data from processing, but in case of all other land types it is justified to use winter data. Especially in case of water bodies, where frozen water acts as permanent scatterers, while liquid water does not. In forest areas, different objects act as permanent scatterers – roads in forest during summer time and broad-leaved trees without leaves in winter time.

Results presented in this work can be further used in other works using PSInSAR method and calculating vertical deformations of surfaces. Other researchers can raise their accuracy of calculations, when they have certain knowledge on which data to use and which to disregard, depending on seasons and land types.

Lisad

Lisa 1. 1995.-1999. aasta Ida-Virumaa aegrea SAR andmed suvekuude kohta

Kuupäev	Ajaline vahe juhtpildiga päevades	Efektiivne vahekaugus juhtpildist meetrites
21.05.1995	-806	-204
30.07.1995	-736	244
31.07.1995	-735	239
03.09.1995	-701	-36,5
04.09.1995	-700	-98,6
19.08.1996	-350	117
17.03.1997	-140	51,3
26.05.1997	-70	-101
04.08.1997	0	0
22.03.1999	595	-132
26.04.1999	630	-274
05.07.1999	700	-50,1

Lisa 2. 1993.-2001. aasta Ida-Virumaa aegrea SAR andmed talvekuude kohta

Kuupäev	Ajaline vahe juhtpildiga päevades	Efektiivne vahekaugus juhtpildist meetrites
12.02.1993	-1630	298
15.10.1993	-1390	432
21.01.1996	-561	-286
06.01.1997	-210	-168
13.10.1997	70	138
17.11.1997	105	308
22.12.1997	140	-124
26.01.1998	175	-149
22.11.1999	840	38,3
15.01.2001	1260	166

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristjan Kalam (sünnikuupäev: 04.05.1989),

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

„Talve ja lumikatte mõju püsivate peegeldajate tihedusele sõltuvalt maakattetüübist,“

mille juhendaja on Kaupo Voormansik,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 26.05.2014